

LA CASA BLACK AND WHITE DE LA UPM: LA CASA QUE SIGUE AL SOL

Adell Argilés, J. (1); García Santos, A. (2); Orenes Enfedaque, B. (3)

(1)Prof. Universidad Politécnica de Madrid - Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid. España.

(2)Prof. Universidad Politécnica de Madrid - Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid. España.

(3)Arq. Universidad Politécnica de Madrid - Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid. España.

La trayectoria diaria del sol se sigue fácilmente con las dos Patentes de Invención de la UPM para viviendas, desarrolladas en ocasión de presentar la B&W House en el concurso Solar Decathlon 2009 en Washington, consistentes en: Cubierta Solar Basculante Auto-orientable y Sistema de Paneles Solares Móviles para Edificación. La originalidad de la Cubierta Solar radica en apoyarse y bascular sobre su centro de gravedad mediante dos cables accionados por motores, auto-orientándose hacia el sol. La novedad del Sistema de Paneles Solares reside en que su eje de giro se ubica en las aristas del edificio. Con la coexistencia de ambos inventos se logra obtener la máxima posibilidad de captación solar, integrándose perfectamente en cualquier tipología arquitectónica y consiguiendo por primera vez la independencia de orientación de las viviendas respecto al sol (el Sur en el hemisferio Norte). Otras ventajas de la B&W-House son la máxima eficiencia en captación-gasto, confort interior, captación energética epitelial (eléctrica, térmica e híbrida) y otra Patente que le otorga la singular capacidad auto-transportable con cimentación inteligente, que no requiere ni grúa y ni suelos nivelados.

Palabras Clave: Cubierta Solar Basculante, Paneles Solares Móviles, Vivienda Auto-transportable, captación energética epitelial, independencia de la orientación solar.

THE UPM BLACK AND WHITE HOUSE: A STEADY TRACKING HOUSE

The daily sun trajectory is easily tracked by the two Registered Patents presented by the UPM for housing, developed for the Spanish B&W-House prototype for the Solar Decathlon 2009 in Washington, consisting in: the Self-Orientable Tilt PV-Solar Roof and the Mobile Building Integrated Photovoltaic Modules System. The originality of the PV-Solar Roof lies on being supported and tilted over its gravity centre using two wires moved by motors. The innovation of the PV-Module-System is that the rotation axis is placed on the corner edges of the building. The coexistence of these inventions maximizes solar gain being integrated in any architectural building typology, achieving for the first time the independence of housing development from sun orientation (South in the Northern Hemisphere). Other advantages of the B&W-House are the optimized relation gaining-losses, great interior comfort, skin energy harvesting (electrical, thermal, and hybrid) and the development of another UPM-Patent making the house self-transportable with intelligent foundations, which requires no crane or levelled grounds.

Key words: Self-Orientable Tilt PV Solar Roof, Mobile Building Integrated Photovoltaic Modules, Self-transportable house, skin energy harvesting, independence from solar orientation.

1 LA CASA B&W

La casa Black and White, y con ella sus patentes de invención, se desarrolló con motivo de la presentación de la UPM en el concurso Solar Decathlon 2009, en su edición en Washington. Este ya reconocido concurso internacional evalúa las casas solares desarrolladas por los 20 equipos universitarios candidatos en términos de diseño arquitectónico, construcción, adaptabilidad, instalaciones y sobre todo captación de energía solar entre otros.

La B&W House fue concebida por el TeamSpain de la UPM como prototipo de arquitectura capaz de maximizar y optimizar la captación solar fotovoltaica utilizando el máximo área útil de la envolvente arquitectónica con este fin. En base a esta premisa principal de integración, la configuración de la casa se ideó como un contenedor o caja fotovoltaica que pudiera abrirse al Sur y cerrarse al Norte y cuya envolvente (fachadas y cubierta) pudieran orientarse a lo largo del día de Este a Oeste siguiendo la trayectoria solar.

El presente artículo demostrará, a través de cálculos realizados y tablas explicativas, el incremento de la captación solar la casa B&W, con la cubierta y fachadas auto-orientables, con respecto al sistema fijo de captación fotovoltaica integrada en la edificación (BIPV).

Este texto se enmarca dentro del estudio de captación solar fotovoltaica realizado con motivo del incipiente desarrollo de una ambiciosa investigación desarrollada en el marco del Grupo TISE del Departamento de Construcción y Tecnología Arquitectónicas de la Escuela Superior de Arquitectura de Madrid, de la UPM, por estudiar y comparar la captación solar efectiva de las casas presentadas en el concurso Solar Decathlon desde su creación hace ya más de una década, debido a la variada y extensa muestra existente y el marco cronológico en el que se desarrollaron.

El prototipo construido tiene geometría cuadrada en planta, con una sola altura, con una cubierta ligeramente inclinada, capaz de dividirse en tres módulos para simplificar su transporte, sistema éste que fue igualmente patentado pues es auto-transportable y de fácil implantación con la cimentación inteligente, aunque no objeto del presente artículo, enfocado a la captación solar. Sobre este volumen prismático de la casa se dispone una pirámide invertida que sostiene la cubierta solar capaz de seguir la trayectoria del Sol en cada momento hasta volver a la posición horizontal por la noche.

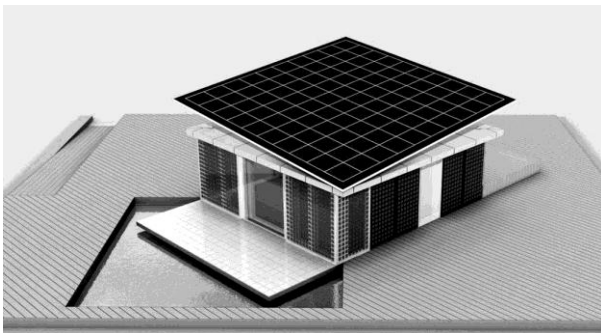


Figura 1: La casa B&W.

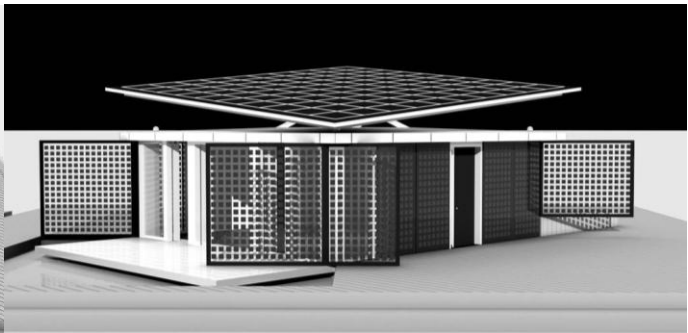


Figura 2: Paneles orientables de la casa B&W

La integración arquitectónica conjunta de los dos sistemas patentados en la UPM por el catedrático Dr. Josep M. Adell: los paneles fotovoltaicos móviles auto-orientables en fachada y cubierta basculante de la casa B&W de la UPM, que siguen al sol, supone un incremento de la captación de energía solar total anual de un 40% - 50% más con respecto a los paneles fotovoltaicos fijos en todas sus fachadas y la cubierta fija orientada al Sur.

El procedimiento utilizado para la simulación de la captación solar fotovoltaica de toda la envolvente, tiene en consideración entre otros la ubicación geográfica y orientación de la casa B&W con respecto al Sur o la declinación media mensual.

Con el objeto de homogeneizar la muestra, es importante recalcar que los datos que aquí se van a mostrar responden a la ubicación geográfica y clima de Madrid, España, estudiando la captación de los paneles y cubierta fijos frente a los resultados del seguimiento de los paneles móviles en fachada y de la cubierta basculante a cada hora de cada día juliano seleccionado de cada mes del año. Estos doce días seleccionados responden a la necesidad de selección de un día representativo de cada mes en el que la declinación del Sol sea más próxima a la media mensual por lo que se obtienen datos anuales fiables, así como la complementariedad de los dos sistemas patentados empleados a lo largo del año, datos que no podrían ser concluyentes de realizar el estudio durante un solo mes.

2 PATENTES

Para mejorar la comprensión de los dos de sistemas de captación fotovoltaica patentados empleados en la casa B&W de la UPM, a continuación los describiremos por separado para posteriormente aunarlos para obtener la captación de energía solar anual de la casa, justificando así su complementariedad.

2.1 PATENTE SISTEMA DE PANELES SOLARES MÓVILES PARA LA EDIFICACIÓN

Esta novedosa patente tiene por objeto el aprovechamiento máximo de fachadas y cubiertas para la captación y seguimiento solar en cada momento del día. Los paneles fotovoltaicos ubicados sobre la envolvente de un edificio, pueden seguir la trayectoria del Sol mediante la disposición de sistemas de tipo abisagrado que permitan que las aristas del cuerpo edificado se conviertan en ejes de giro.

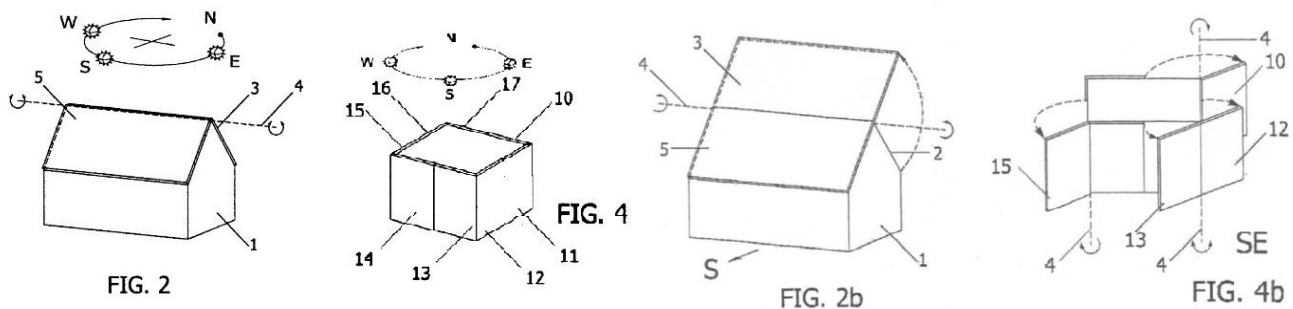


Figura 3: Dibujos de la patente del sistema de paneles móviles.

Su desarrollo consiste en un marco estructural metálico que soporta al conjunto de módulos fotovoltaicos que constituyen cada panel en cada fachada de la casa.

Este entramado metálico incluye bisagras que permiten esa movilidad de los paneles alrededor de las aristas de intersección entre los planos de cada fachada. Así mismo, se han dispuestos unas sujeciones en las esquinas inferiores de los paneles a modo de anclaje al suelo en cada una de las posiciones u orientaciones que abarque cada panel.

2.2 PATENTE CUBIERTA SOLAR BASCULANTE AUTO-ORIENTABLE

El objetivo principal de esta patente es la construcción de una cubierta capaz de orientarse al sol a cada momento manteniéndose siempre dentro de los límites de la proyección horizontal de la planta del edificio al que cubre, sin sobresalir de los aleros, partiendo de la máxima superficie de ocupación de suelo que tenga el edificio. Esto se consigue mediante el balanceo de esta cubierta sobre una rótula en su punto central, guiado por medio de unos medios de conexión entre los vértices opuestos de la cubierta y unos motores conectados a ellos.

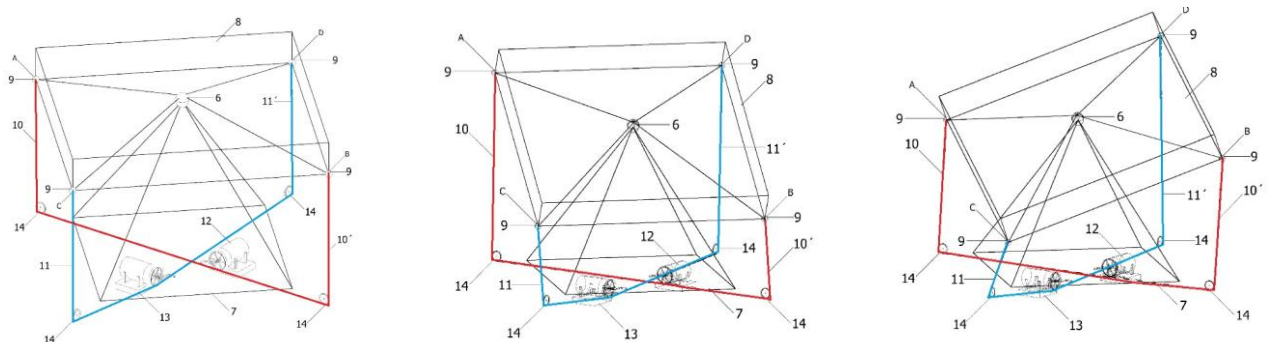


Figura 4: Dibujos de la Patente. Movimientos de la cubierta-seguimiento solar.

3 CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO

3.1 DISEÑO Y RAZÓN ARQUITECTÓNICA

La geometría de la casa B&W de la UPM, permite satisfacer al máximo las necesidades energéticas de la casa pues tiene un óptimo factor de forma en donde se minimizan las pérdidas por la escasa superficie envolvente respecto del máximo espacio interior generado.

El concepto arquitectónico básico de la casa Black and White (casa Blanco y Negro) es la influencia del Sol en su diseño. Se adoptan conceptos Zen y la sensibilidad del cuerpo humano y su capacidad para reaccionar ante cambios ambientales de su entorno. La B&W se creó como respuesta a la demanda de los entornos naturales y urbanos.

Es por ello que la envolvente del edificio se convierte en una piel activa, sensible a su entorno, capaz, no sólo de captar energía solar, sino de transmitir la luz al espacio interior, mediante la creación de paneles fotovoltaicos de diseño traslúcido a modo de celosías, que matizan el espacio vividero interior y exterior, y permiten una permeabilidad lumínica del 45%.

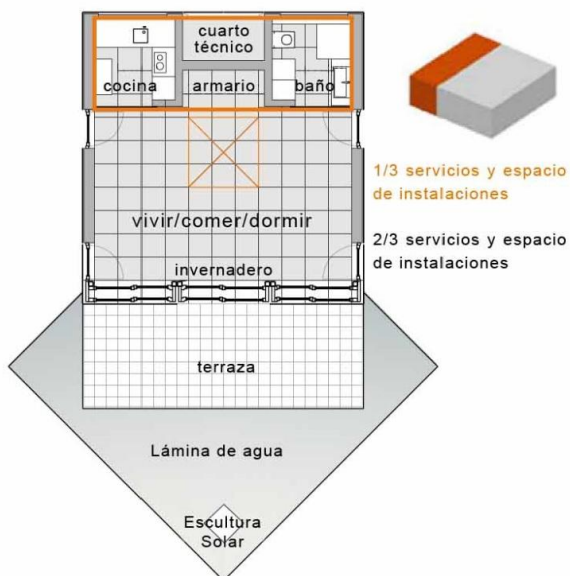


Figura 5: Programa arquitectónico.



Figura 6: Panel fijo híbrido y panel móvil en celosía.

La organización espacial de la casa permite generar un espacio interior de máximo aprovechamiento dado que el área de servicio, cocina y zonas técnicas y de almacenaje queda compactada a sólo 1/3 quedando el resto de la casa, 2/3, de libre configuración, multiuso, como comedor, sala de estar y dormitorio. Bajo la cubierta hay un lucernario piramidal que ilumina esta zona multiusos de manera cenital, y que está situado bajo la cubierta solar basculante auto-orientable. La casa se abre al Sur mediante una terraza que da a un estanque que crea un efecto climático suavizado.

La casa B&W de la UPM, está diseñada para poder dividirse en tres remolques que encajan lateralmente hasta configurar el espacio final. Las claves son: la facilidad del transporte y el fácil montaje en cualquier parte del mundo. Para ello se patentó el ya mencionado sistema activo de cimentación inteligente, que permite el asentamiento de la plataforma-remolque de cada módulo y su ensamble sin la previa nivelación del terreno. El prototipo construido se dividió en tres módulos-remolques de tamaño estándar para su traslado por autopista (13,5 m largo x 2,55 m ancho x 4,05 m alto).

Esta modularidad permite igualmente el crecimiento progresivo de la casa tanto en altura como en ocupación en planta. Pudiendo satisfacer necesidades de desarrollo urbano sostenible, y manteniendo intacta la utilidad de las patentes de captación solar en ellas implantadas.

La casa por tanto puede pasar de tener 51 m² como es el caso del prototipo construido a 102 m² o incluso más de 147 m², en función de la disposición de los módulos, ya sea horizontal o verticalmente. Por esto es la casa que mejor se amplía.

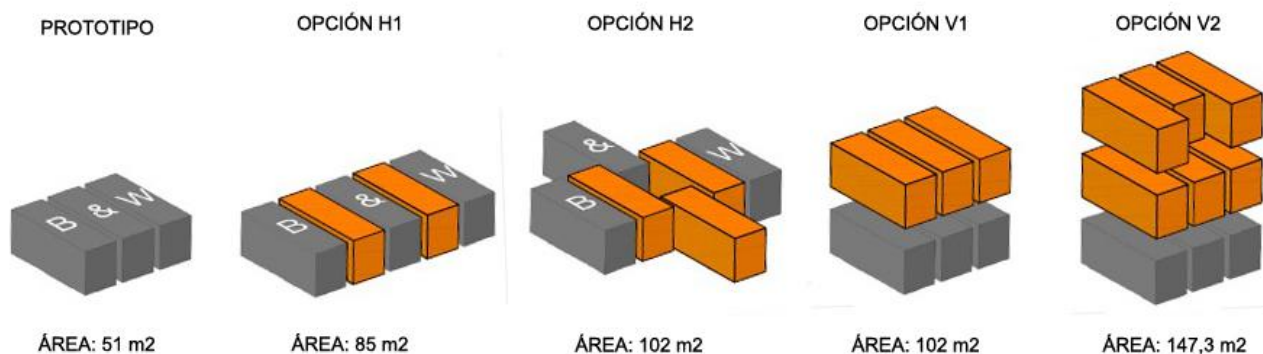


Figura 7: Ampliación modular. Desarrollos en planta (H1-H2) y en altura (V1-V2).

3.2 DISEÑO Y RAZONES ENERGÉTICAS PASIVAS

La idea principal de la Casa B&W en términos energéticos es lograr la máxima eficacia mediante el empleo de sistemas pasivos y tecnologías innovadoras. Es por ello que las dimensiones de esta casa fueron calculadas específicamente para obtener un espacio acondicionado mínimo que contrasta con la máxima superficie de captación de radiación solar.

Se trata de una edificación compacta y cuadrada que minimiza las pérdidas de energía. Toda la envolvente está completamente aislada con 25 cm de aislamiento, triple vidrio o el invernadero hacia la terraza, sistemas con los que se regula la iluminación y temperatura interior. La doble cubierta proporciona protección contra la radiación solar, la lluvia, el calor y el frío. La doble fachada del invernadero funciona como regulador climático interno. Los acabados opacos y transparentes de la envolvente tienen una transmisión térmica baja que garantizan ese aislamiento y previenen las pérdidas de temperatura hacia el exterior. Igualmente, en el falso techo existen placas de material de cambio de fase (PCM) para regular el calor y el frío y ahorrar energía para el sistema de agua caliente y calefacción.

Estas medidas abaratan considerablemente el acondicionamiento de la casa y se complementa con los sistemas de captación epitelial bien para captación de energía fotovoltaica o bien para la producción de agua caliente almacenable, que surte tanto al uso sanitario como a calefacción.

La automatización de la casa controla conjuntamente: el movimiento de la cubierta, la iluminación, acondicionamiento de aire interior y el sistema de agua caliente sanitaria y calefacción, permitiendo una mayor eficiencia energética y conseguir el máximo confort durante todo el año con el mínimo consumo y gasto.

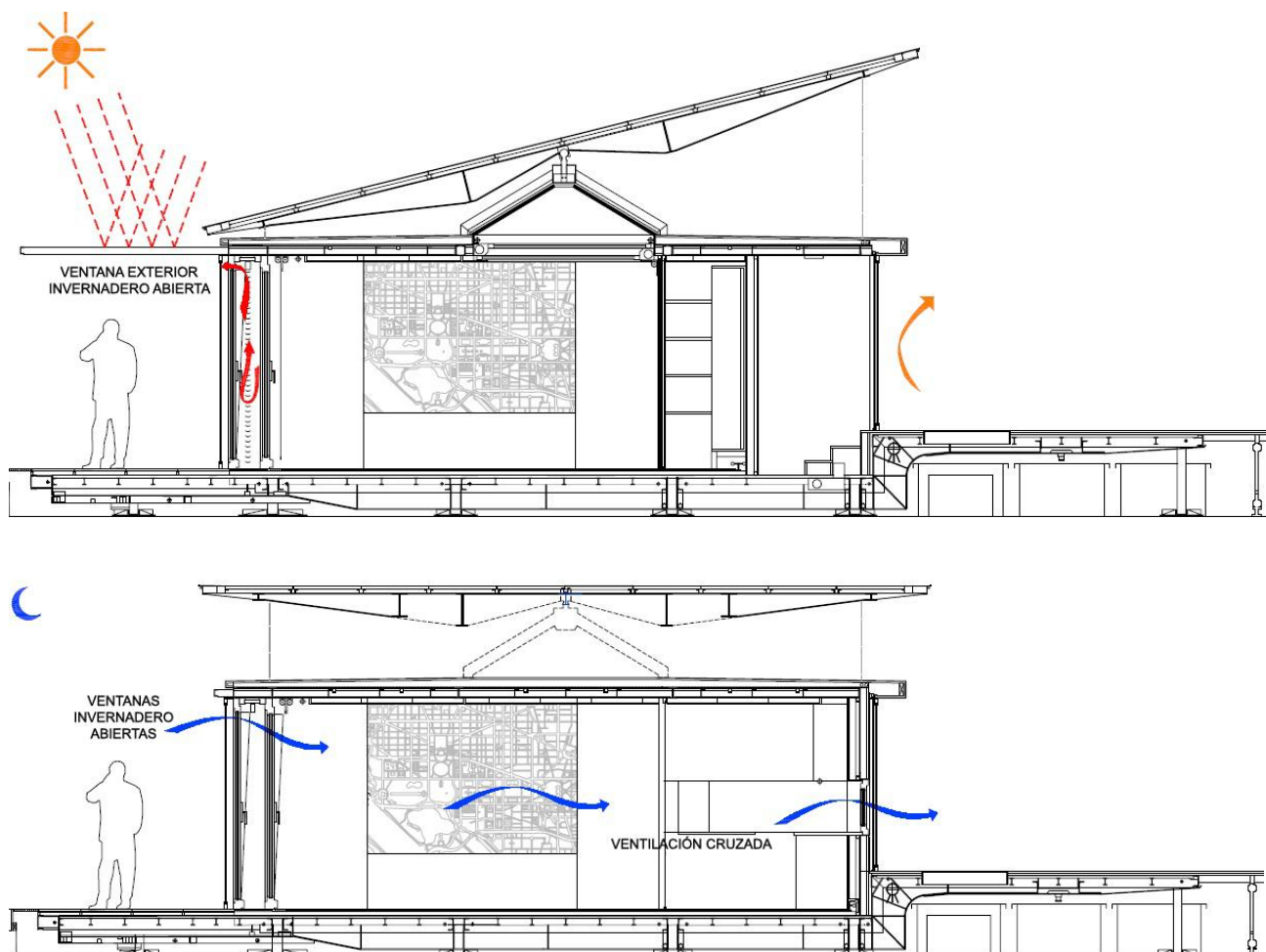


Figura 8: Sistemas pasivos. Comportamiento en verano.

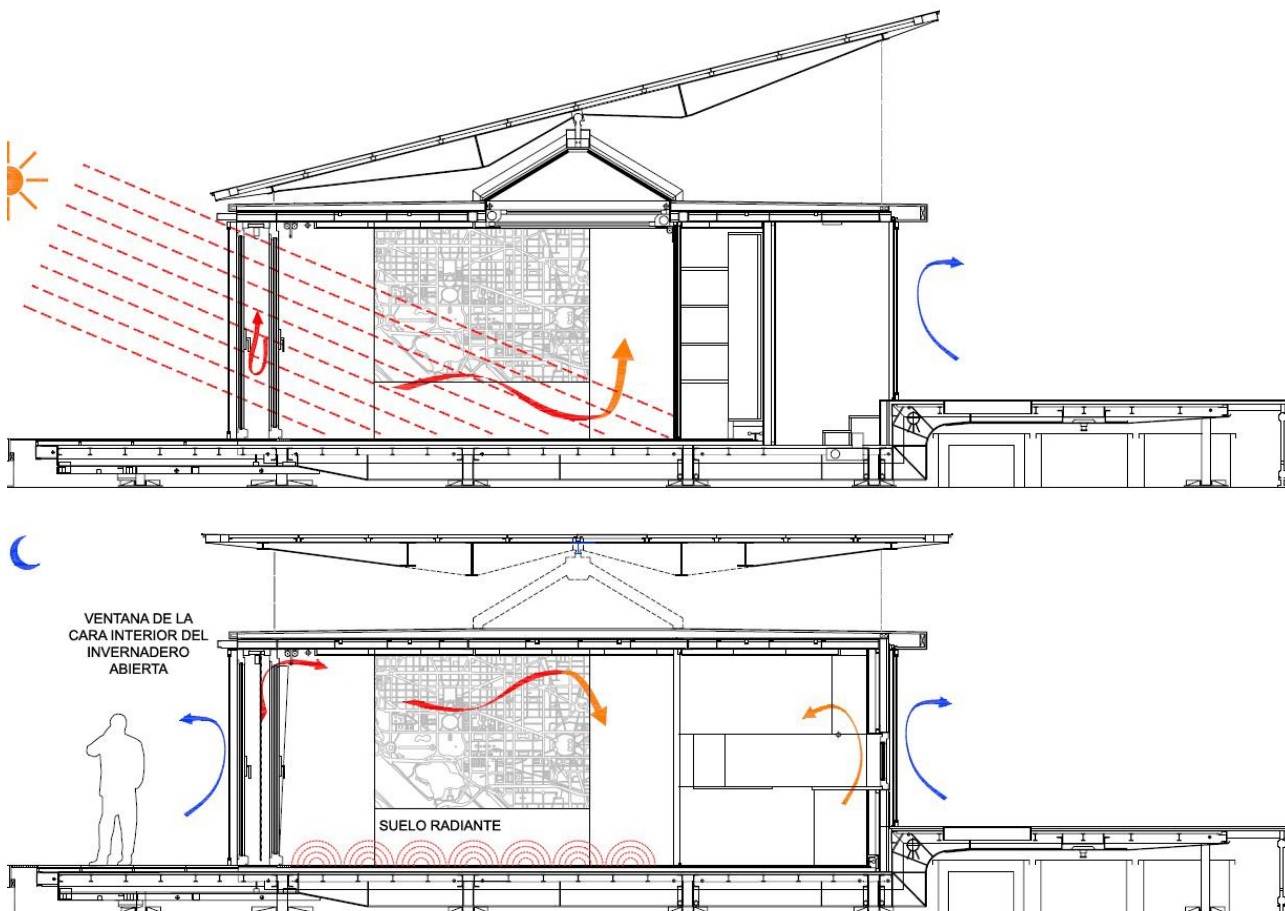


Figura 9: Sistemas pasivos. Comportamiento en invierno.

Los sistemas fotovoltaicos dispuestos en la cubierta y en las fachadas se complementan con los paneles solares térmicos aumentando considerablemente la producción energética de la casa.

La envolvente de la casa B&W de la UPM está compuesta por varios sistemas de captación energética: los paneles fotovoltaicos ciegos en cubierta y fachadas, los paneles fotovoltaicos en celosía en fachadas, paneles solares térmicos en cubierta, tubos de vacío en óptima orientación y paneles híbridos (fotovoltaicos y fototérmicos).



Figura 10: Tipos de captadores fotovoltaicos: Celosías, Híbridos y Ciegos.

4 CAPTACIÓN SOLAR FOTOVOLTAICA. INNOVACIÓN TÉCNICA APLICADA.

La casa B&W de la UPM optimiza la captación epitelial que, como hemos visto, almacena la energía calorífica y la reutiliza. Pero además, es la casa que más energía capta, tanto por la fachada, como por la cubierta.

Aquí radica su verdadero ingenio. Estos dos elementos constructivos son en esta casa fruto de la implantación de dos patentes: los paneles fotovoltaicos móviles auto-orientables en fachada y cubierta basculante de la casa B&W de la UPM. Ambos sistemas giran o basculan siguiendo al Sol, y por lo tanto, maximizan la captación de radiación solar empleando la misma superficie que si estuviesen fijos pero siendo más eficientes por más horas.

El estudio teórico de la captación solar en base a las patentes de invención desarrolladas (cubierta – paneles móviles) sobre la geometría de la B&W House permitirá demostrar la mejora de la captación solar conjunta de los dos sistemas integrados en la casa frente a sus homólogos fijos.

4.1 MODELO DE CÁLCULO

Como punto de partida, tendremos los datos climáticos correspondientes a Madrid, España, con una latitud de 40.45° . Orientando el edificio a 45° del Sur.

Los cálculos se realizarán para los siguientes días representativos de cada mes del año:

Mes	Día Juliano (d_n)	Mes	Día Juliano (d_n)
01	17	07	198
02	46	08	228
03	75	09	258
04	105	10	289
05	135	11	319
06	161	12	345

La disposición de los paneles en fachada del modelo teórico será tal y como marca la patente de invención y se ubicarán paneles fotovoltaicos en todas las fachadas. La comparación de la captación de radiación anual se realizará con respecto a paneles fijos. Los ejes de giro de los paneles de la fachada son las cuatro aristas de encuentros entre ellas.

La cubierta, en la hipótesis fija, se orientará al Sur ($\alpha=0^\circ$) y con una inclinación de 30° ($\beta=30^\circ$). Los paneles fijos estarán orientados a NE ($\alpha= -135^\circ$), SE ($\alpha= -45^\circ$), SW ($\alpha=45^\circ$) y NW ($\alpha= 135^\circ$), y con una inclinación fija de 90° ($\beta=90^\circ$).

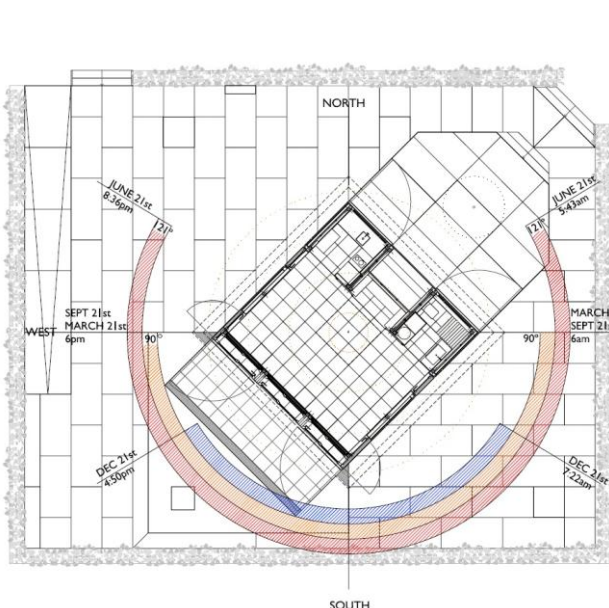


Figura 11: Trayectoria anual del Sol y orientación.

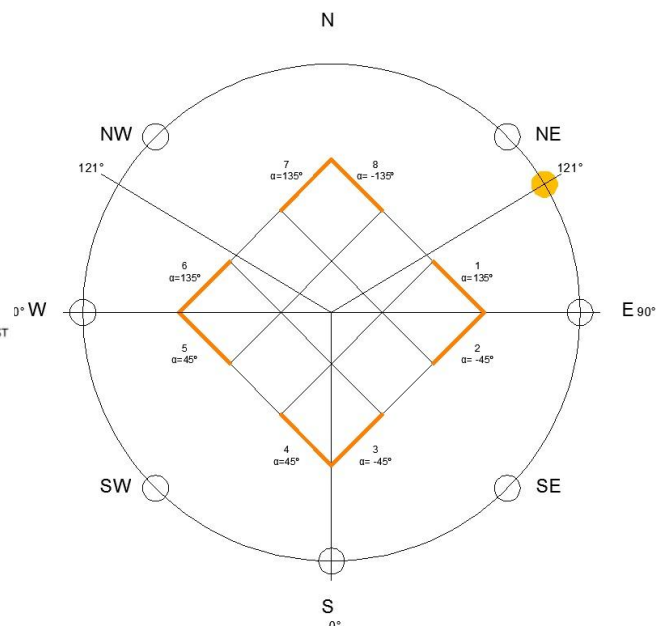


Figura 12: Orientación de los paneles fijos en fachada.

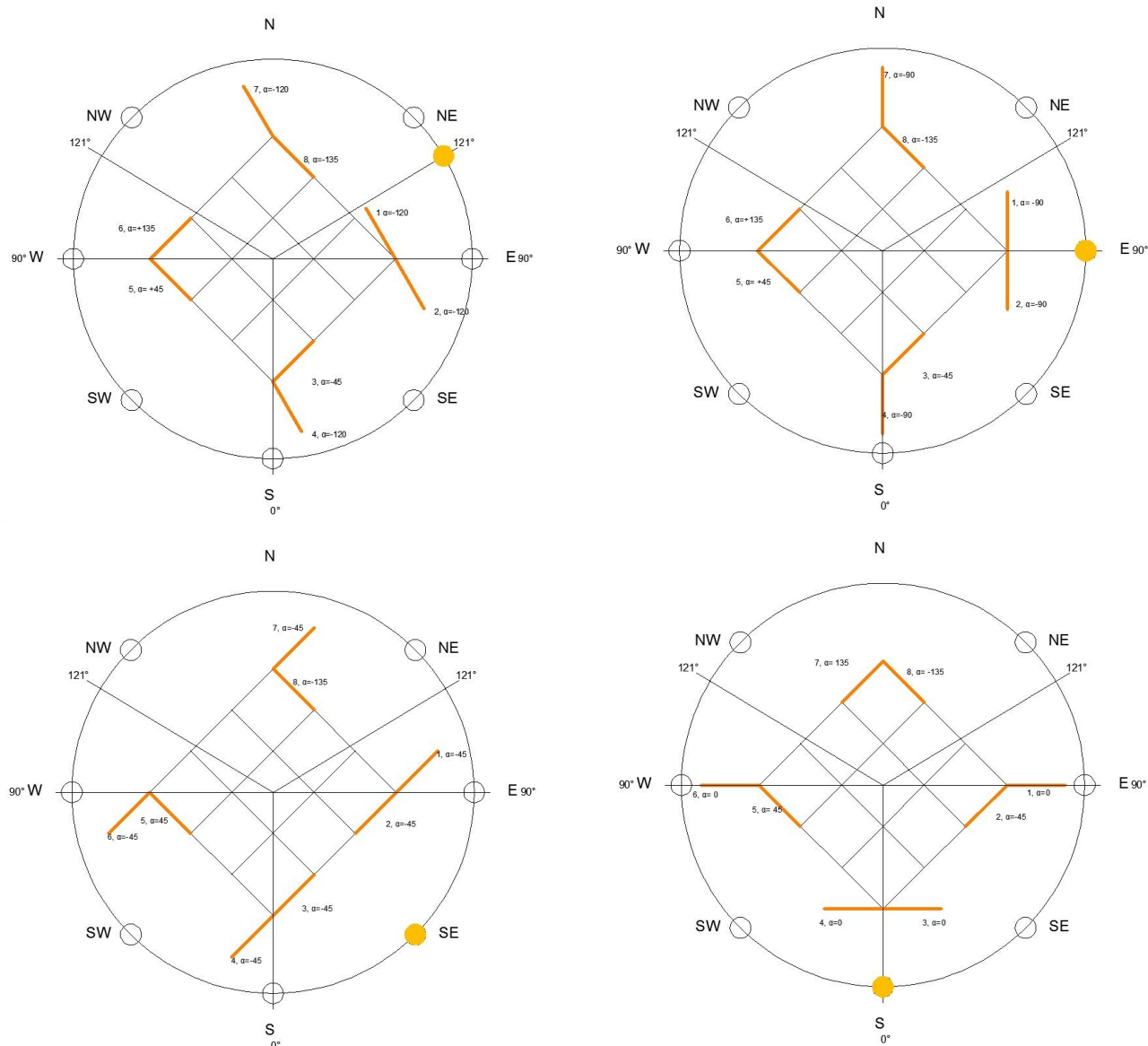


Figura 13: Posición de los paneles móviles de fachada siguiendo la trayectoria solar. Para las orientaciones SW, W y NW, los gráficos serán simétricos a SE, E y NE respectivamente.

La radiación solar sobre los paneles fotovoltaicos móviles en fachadas se ha calculado teniendo en cuenta que el ángulo con respecto al Sur coincidiese con el ángulo de la hora solar a la que sigue, aunque en los gráficos anteriores éstos movimientos se hayan simplificado a las principales orientaciones por claridad. En el caso de la cubierta solar basculante auto orientable, para este estudio son válidos los gráficos explicativos de la patente pues en este caso sigue al sol a cada momento hasta quedarse en posición horizontal en la noche.

Una vez expuesta la capacidad de seguimiento de estos sistemas, en esta sección, se expondrán a continuación los cálculos de la captación de radiación global anual expresada en (kWh/m^2) y desglosada por meses. Los resultados de mejora pueden observarse en porcentaje tanto anual como mensualmente.

La importancia de calcular la irradiación a lo largo de un periodo anual, permite que la simulación sea veraz, y puedan contrastarse los comportamientos de ambos sistemas de captación en verano e invierno y pudiendo llegar a la conclusión de que la orientación de la edificación con respecto al Sur es independiente de los resultados, siendo éstos muy similares al poder orientarse.

CUBIERTA			(%)
Mes	Fija	Basculante	MEJORA
Enero		3041	3287
Febrero		4252	4771
Marzo		4602	5371
Abril		5621	7040
Mayo		5677	7217
Junio		6109	7995
Julio		6876	9264
Agosto		6687	8789
Septiembre		5535	6651
Octubre		4281	4809
Noviembre		3268	3583
Diciembre		2883	3070
Anual	58833	71846	122%

Figura 14: Captación Radiación Solar mensual y anual en cubierta (kWh/m²).

PANELES 1 y 6			(%)
Mes	Fijo	Móvil	MEJORA
Enero	617	2099	340%
Febrero	877	2848	325%
Marzo	1376	2965	215%
Abril	2152	3580	166%
Mayo	2529	3392	134%
Junio	2865	3561	124%
Julio	3071	4099	133%
Agosto	2628	4238	161%
Septiembre	1661	3486	210%
Octubre	968	2768	286%
Noviembre	669	2268	339%
Diciembre	553	1976	357%
Anual	19965	37281	187%

Figura 15: Captación Radiación Solar mensual y anual en paneles de fachada NE-NW (kWh/m²).

En las tablas de las figuras 14 y 15 puede observarse cómo en los meses de menor captación de la cubierta la casa es capaz de optimizar su superficie útil envolvente y complementar el descenso de captación energética de la cubierta en los meses de invierno con los paneles, que ven triplicada su funcionalidad frente a sus homólogos fijos. En cada periodo mensual los paneles verticales de fachada son capaces, al orientarse, de que la superficie que ocupan de la envolvente sea eficiente pues en la hipótesis de paneles fijos, esas orientaciones tan sólo producirían energía durante medio año, y se habría optado por eliminar esa superficie de captación.

Los paneles orientados a 45° con respecto al sur ubicados en la arista Sur, paneles 3 y 4, incrementan su captación en torno a un 56% de media siendo los que mayor irradiación reciben a lo largo del año. En cambio, los paneles orientados a 135° con respecto al Sur ubicados en la arista Norte ven reflejado ese incremento medio en 86%, obteniendo con la orientación de los paneles una eficiencia real a lo largo de todo el año, y no tan sólo de Marzo a Septiembre como sucede con los fijos.

Sin embargo, los paneles 2 y 5 al tener menos opción de giro por la geometría y orientación del edificio, y aun recibiendo un total anual de 40.148 kWh/m² apenas ven incrementada su captación (7%).

PANELES 3 y 4			(%)
Mes	Fijo	Móvil	MEJORA
Enero	2429	3664	151%
Febrero	3177	4968	156%
Marzo	3106	4866	157%
Abril	3463	5413	156%
Mayo	3133	4737	151%
Junio	3190	4866	153%
Julio	3634	5850	161%
Agosto	3940	6424	163%
Septiembre	3584	5803	162%
Octubre	3041	4732	156%
Noviembre	2595	3955	152%
Diciembre	2324	3483	150%
Anual	37616	58762	156%

Figura 16: Captación Radiación Solar mensual y anual en paneles de fachada SE-SW (kWh/m²).

PANELES 7 y 8			(%)
Mes	Fijo	Móvil	MEJORA
Enero	617	1398	227%
Febrero	877	2056	235%
Marzo	1376	2627	191%
Abril	2152	3875	180%
Mayo	2529	4068	161%
Junio	2865	4582	160%
Julio	3071	5324	173%
Agosto	2628	4958	189%
Septiembre	1661	3292	198%
Octubre	968	2082	215%
Noviembre	669	1540	230%
Diciembre	553	1278	231%
Anual	19965	37080	186%

Figura 17: Captación Radiación Solar mensual y anual en paneles de fachada NE-NW (kWh/m²).



Figura 18: La casa Blanco y Negro (Black and White) de la UPM para el U.S. Solar Decathlon 2009.

5 CONCLUSIONES

El análisis de los resultados del estudio arriba expuesto, demuestran:

Que la casa B&W de la UPM Es la casa que más energía capta. Con la adaptación de los dos sistemas patentados, la cubierta solar basculante auto-orientable y los paneles fotovoltaicos móviles que siguen al Sol, supone que en Invierno la casa aprovecha la radiación con menor ángulo de incidencia a través de sus fachadas, mientras que en verano, la cubierta optimiza la captación solar a cada momento, complementando con las fachadas las últimas horas de Sol. Excelente complementariedad de los sistemas con carácter anual.

Ganancia media anual total de entre un 40 y un 50% con respecto a sistemas fijos.

Los paneles móviles fotovoltaicos tienen un 86% de incremento de la captación de radiación solar fotovoltaica anual en determinados paneles, cuya orientación es más desfavorable en posición fija, como por ejemplo paneles fijos en fachada orientados al NE-NW-SE y SW, y un mínimo de un 7% en los mejor orientados. Por lo que optimiza la superficie máxima de la envolvente arquitectónica para la captación de energía.

La cubierta solar basculante auto-orientable a treinta grados de inclinación y que sigue la trayectoria del Sol, incrementa la captación de radiación solar anual en hasta un 22% respecto de la cubierta a treinta grados orientada al Sur en posición fija.

6 BIBLIOGRAFÍA

- Adell, J.M.; AA.VV. *Sistema de paneles solares móviles para la edificación*. Patente de la Universidad Politécnica de Madrid, España, nº ES 2.346.026 enero 2009.
- Adell, J.M.; AA.VV. *Cubierta Solar basculante auto-orientable*. Patente de la Universidad Politécnica de Madrid, España, nº ES 2.345.085 enero 2009.
- Adell, J.M. 2011. "La B&W House en el Solar Decathlon 2009" en *Energía: Desarrollos tecnológicos en la protección medioambiental*. Comisión Nacional de Energía. Págs.151-154 (+ CD). Madrid.
- Adell, J.M. 2010. "La B&W House" en *Un sol, 2 mundos, 3 casas: La Universidad Politécnica de Madrid en el Concurso Solar Decathlon EEUU 2005-2007-2009*. Ed. Munilla Lería. Págs.73-105. Madrid.
- Manuel Ytong. 2013. *Eficiencia-Sostenibilidad-Ecología con mortero celular curado en autoclave*. Barcelona.
- Adell, J.M.; AA.VV. 'New building integrated PV mobile modules system'. 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference. 21-25 Septiembre 2009, Hamburgo.
- Adell, J.M.; AA.VV. 'New PV self orientating roof based on a balanced movement'. 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference. 21-25 Septiembre 2009, Hamburgo.